

УДК 621.983

Кругликов Н.А., Логинов Ю. Н., Каменецкий Б.И., Волков А. Ю.

## ПОЛУЧЕНИЕ ТОНКОЙ ЛЕНТЫ ИЗ МАГНИЯ ПРИ КОМБИНАЦИИ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

**Ключевые слова:** магний, фольга, структура, свойства, магниевая лента микроструктура, холодная прокатка, поперечное выдавливание, текстура, ячеистая субструктура, динамическая рекристаллизация.

### Введение

Магниевая фольга является уникальной продукцией и может применяться в перспективных химических источниках тока, в диффузорах высококачественных динамиков (твиттеров) и в приложениях для ядерной промышленности. Стоимость фольги зависит от ее толщины и может в разы превышать стоимость золота. Степень деформации материала до возникновения первой трещины (далее – деформируемость) при холодной прокатке листовой заготовки в значительной мере зависит от её структуры и текстуры. В свою очередь структура и текстура определяются способами её изготовления. Традиционная технология изготовления тонкой листовой заготовки из магниевых сплавов подразумевает горячую пластическую деформацию слитка. Это обусловлено низкой технологической пластичностью магния и его сплавов при комнатной температуре, что часто приводит к необходимости создания схем деформации с повышенным уровнем сжимающих напряжений [1]. Пониженная пластичность объясняется особенностями механизмов пластической деформации магния, обладающего ГЦК решеткой: при низких температурах обработки скольжение происходит только в базисных плоскостях [2]. При повышении температуры деформации (220 – 450 °С) задействуются и другие системы скольжения, в результате чего пластичность магния и его сплавов повышается [3-5]. Горячая пластическая деформация магния и его сплавов характеризуется следующими недостатками: большими затратами энергии, окислением поверхности, длительностью цикла изготовления, значительным количеством технологических и вспомогательных операций, отсутствием возможности получения мелкозернистой структуры и улучшенных свойств деформированных изделий [1-6].

Известно [6], что традиционно деформируемые магниевые сплавы систем Mg-Al-Zn имеют тенденцию к развитию сильной базисной текстуры во время листовой прокатки. При таком типе текстуры оси «с» большинства зерен перпендикулярны к плоскости листа, в результате чего снижается деформируемость листа при холодной прокатке. Одним из эффективных способов ослабления сильной базисной текстуры является наложение большой сдвиговой деформации в процессе прокатки. Кроме того, известно, что магний технической чистоты рекристаллизуется при комнатной температуре [7]. Учитывая вышеперечисленные

особенности, нами была предложена новая методика получения фольги, лишенная значительной части недостатков рассмотренных методов [8].

В ее основу положено решение задачи по повышению технологичности за счет получения листовой заготовки из литого образца при помощи холодной деформации и ее дальнейшей холодной прокатки без промежуточных отжигов.

### Материал и методика эксперимента

Уровень механических свойств литого магния не позволяет осуществить его осадку, прокатку или экструзию при комнатной температуре с большими степенями деформации из-за появления трещин. По этой причине деформирование литой заготовки методом поперечного холодного выдавливания осуществляли в условиях воздействия высоких сжимающих напряжений, что позволило получить тонкую листовую заготовку (полосу) за одну операцию.

Литые заготовки изготавливали в форме цилиндра из имеющего трапецеидальную форму слитка магния марки Мг90 ГОСТ 804-93. Сначала дисковой фрезой вырезали образцы в форме параллелепипедов с размерами  $44 \times 44 \times 40$  мм, из них вытачивали цилиндры диаметрами  $D = 42$  мм и высотой  $H_0 = 40$  мм. Перед деформацией торцы и боковую поверхность заготовки покрывали смазкой на основе смеси воска и дисульфида молибдена и устанавливали с небольшим зазором  $\sim 0,2$  мм в канал контейнера, затем выполняли их деформирование при комнатной температуре в полосы шириной 40 мм, и толщиной 1 мм. Относительное обжатие материала заготовки составило 96 % при коэффициенте вытяжке 17. Удельные давления на пуансоне при выдавливании составляли 1200...1300 МПа, а усилие выдавливания составило 1670...1800 кН.

Для осуществления поперечного выдавливания было разработано устройство, схема которого показана на рис. 1. Устройство состоит из следующих деталей: пуансона 1, контейнера 2, фланца 3, болтов 4 и нижней опорной плиты. На выступающую поверхность контейнера 2 установлен фланец 3 и с помощью болтов 4 контейнер 2 скреплен с опорной плитой. На нижней поверхности контейнера 2 выполнены два прямоугольных паза 6 шириной  $b$  и высотой  $h$ , которые пересекаются с каналом контейнера 2 диаметром  $D$ . В канал помещена заготовка 5. Пазы 6 имеют прямоугольное поперечное сечение. Верхние поверхности пазов 6 сопрягаются с каналом контейнера 2 с помощью радиусов, которые показаны на рис. 1. Устройство устанавливается и закрепляется на столе пресса, а пуансон 1 скрепляется с ползуном пресса.

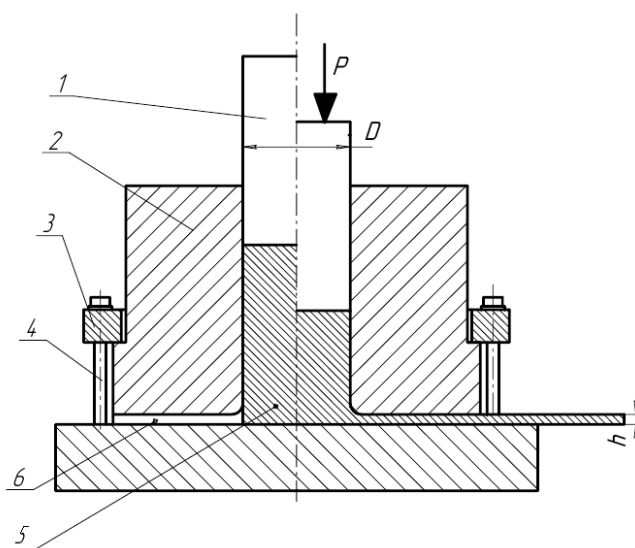


Рисунок 1. Схема устройства для поперечного выдавливания

При работе установки пуансон 1 перемещается под действием усилия пресса. Нижняя торцовая поверхность заготовки 7 при этом деформируется, а материал заготовки 5 вытекает

двумя потоками в щелевые зазоры между нижним торцом контейнера 2 и плоской поверхностью плиты. В результате такого течения материала формируется листовая заготовка в виде полосы толщиной  $h$  и шириной  $b$ , длина полосы зависит от объема исходной заготовки и степени деформации материала. В процессе формоизменения листовая заготовка в виде полосы вытекает в направлении, перпендикулярном приложенному усилию, поэтому подобные способы называются процессами поперечного выдавливания.

Поперечное выдавливание листовой заготовки из массивной литой заготовки имеет ряд особенностей. В начальный момент заготовка 5 опирается нижним торцом на плиту, как показано на рис.1, затем, под действием усилия  $P$  на пуансон 1 часть нижнего участка заготовки 5 осаживается и возникает очаг пластической деформации. По мере перемещения заготовки 5 под действием усилия пресса форма и размеры очага деформации сохраняются, следовательно, наблюдаются признаки стационарного процесса деформации.

На рис. 2 показана штриховой линией верхняя граница очага деформации, ниже этой границы металл пластически деформируется. При формировании листовой заготовки в очаге деформации микрообъемы металла перемещаются по различным траекториям. Наиболее интенсивное течение металла происходит в зоне радиуса  $R$ , сопрягаемого с пазом контейнера, в котором осуществляется формирование листовой заготовки. По траекториям, состоящим из радиуса  $R_1$  и линий, проходящих через середину толщины заготовки, которые размещены по всей ширине заготовки, перемещаются микрообъемы металла «А», создающие слой заготовки в середине ее толщины. Верхние и нижние слои металла заготовки прилегают к поверхностям паза контейнера и нижней плиты. Перемещение этих слоев металла затрудняется из-за интенсивного действия сил трения  $F$ , в результате чего срединный слой заготовки передвигается с большей скоростью и в ней возникают дополнительные сдвиговые деформации. Таким образом, по всей длине заготовки имеются накопленные сдвиговые деформации разной интенсивности, распределенные по ее толщине. Наличие такого распределения деформаций приводит к развороту зерен, что является причиной ослабления базисной текстуры.

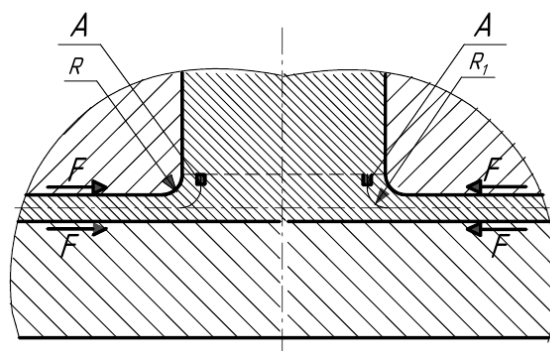


Рисунок 2. Траектории А перемещения металла при поперечном выдавливании и направление сил трения  $F$

Далее листовую заготовку разрезали на мерные длины, которые прокатывали при комнатной температуре в фольги толщиной 50 и 10 мкм без промежуточных отжигов. Прокатку выполняли на стане дуо с относительными обжатиями 12...20% при средней скорости 0,1 м/с. Для изготовления фольги толщиной 50 мкм было выполнено 20 проходов с суммарным относительным обжатием 95%.

Такой способ позволяет за одну операцию при комнатной температуре изготовить из литой магниевой заготовки тонкую листовую заготовку, при этом величины удельных нагрузок на пуансоне составляют ~12 пределов прочности магния. В результате реализации предложенной схемы выдавливание осуществляется при очень высоком уровне сжимающих напряжений, что предотвращает образование пор и микротрещин, обеспечивая повышение пластических свойств. Кроме того, вследствие одновременного прохождения процессов ди-

намической рекристаллизации достигается получение мелкозернистой структуры со средним размером зерна 5...10 мкм.

### Микроструктура и механические свойства

Образцы из слитка магния имеют низкий уровень механических свойств: временное сопротивление  $\sigma_b = 80 \dots 110$  МПа, относительное удлинение  $\delta = 6 \dots 8\%$  и столбчатую структуру с зернами вытянутой формы длиной до 30 мкм и шириной до 5 мкм. После поперечного холодного выдавливания размер зерна уменьшился до 5...10 мкм и, за счет сдвиговой деформации, возникла текстура, с углом между нормалью к плоскости базиса кристаллической решетки и нормалью к плоскости заготовки от  $0^\circ$  до  $30^\circ$ . Такие кристаллографические особенности обеспечивают высокую деформируемость материала.

При холодной прокатке, магний рекристаллизуется, формируются новые зерна и ячеистая субструктура, происходит дальнейшее измельчение структурных элементов и текстура становится более острой. Размер зерен в фольге не превышал 5 мкм, а в ячеистой субструктуре наблюдались кристаллиты с большеугловыми разориентировками и размерами 0,2...0,7 мкм.

На рис. 3, а показана микроструктура исходного листа, на рис. 3, б - магниевой фольги толщиной 120 мкм, (относительное обжатие 88%), а на рис. 3, в - магниевой фольги толщиной 10 мкм (относительное обжатие 99%). В результате электронно-микроскопических исследований было установлено, что нормали к плоскости базиса некоторых зерен имеют углы с нормалью к плоскости заготовки до  $30^\circ$ . Трещин и других дефектов на поверхности фольги не было обнаружено. При изготовлении фольги толщиной 10 мкм было выполнено 27 проходов с суммарным относительным обжатием 99%, трещин и других дефектов не было обнаружено.

При холодной прокатке листовой заготовки, имеющей мелкозернистую структуру, формируются новые зерна и ячеистая субструктура. Как следствие, происходит дальнейшее измельчение структурных элементов и наблюдается более острая текстура базиса, за счет уменьшения интенсивности накопленных сдвиговых деформаций по толщине листовой заготовки. Размер зерен в фольгах не превышал 5 мкм, а в ячеистой субструктуре наблюдались кристаллиты с большеугловыми разориентировками и размерами 0,2...0,7 мкм. Эти результаты указывают на постоянно действующие при прокатке магния обратимые механизмы деформации: динамической рекристаллизации и формирования субструктуры в новых зернах, которые обеспечивают измельчение структуры и способность к дальнейшей деформации.

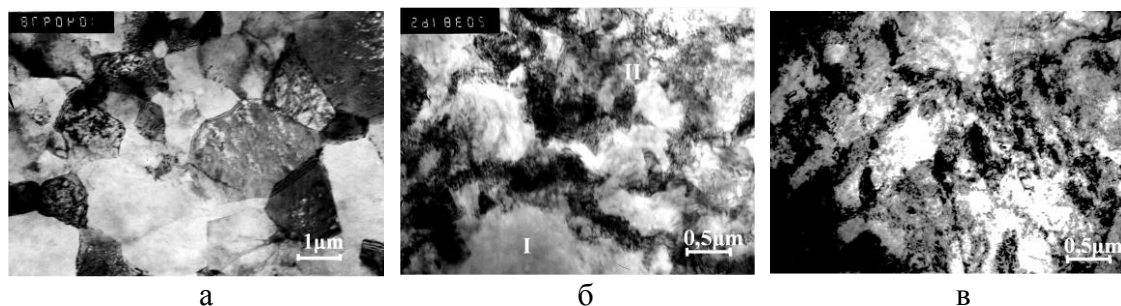


Рис. 3. Микроструктура поверхности исходного листа (а), фольги толщиной 120 мкм (относительное обжатие 88 %) (б) и толщиной 10 мкм (относительное обжатие 99 %) (в)

### Заключение

На основании серии экспериментов по холодному выдавливанию из литых цилиндрических образцов тонких листовых заготовок было установлено, что эти заготовки, имеют вы-

сокую деформируемость при холодной прокатке. Для формирования листовой заготовки с мелкозернистой структурой необходимо выполнить следующие условия:

Обеспечить выполнение интенсивного пластического формоизменения литой массивной заготовки за одну операцию при комнатной температуре с относительным обжатием 95–98%. Высокая деформируемость листовой заготовки при холодной прокатке обусловлена наличием мелкого зерна и накопленных сдвиговых деформаций разной интенсивности, распределенных по ее толщине, которые вызывают ослабление базисной текстуры.

Предложенная методика позволяет избежать затрат энергии на нагрев заготовок, предотвратить окисление поверхности и существенно снизить трудоемкость процесса за счет ликвидации ряда вспомогательных операций по травлению и очистке поверхности полуфабрикатов.

### Список литературы

1. Каменецкий Б.И., Логинов Ю.Н., Кругликов Н.А. Влияние условий бокового подпора на пластичность магния при холодной осадке. Технология легких сплавов. 2012. № 1. С. 86-92.
2. Кругликов Н.А., Логинов Ю.Н., Каменецкий Б.И., Саврай Р.А., Долматов А.В., Клюкин И.В., Волков А.Ю. Микроструктура и механические свойства литого магния. Литейщик России. 2013. № 8. С. 17-21.
3. Магниеые сплавы. Ч.2. Справочник. Технология производства и свойства отливок и деформированных полуфабрикатов. Под ред. И.И. Гурьева, М.В. Чухрова. М.: Металлургия, 1978. 296 с.
4. Логинов Ю.Н., Буркин С.П., Сапунжи В.В. Изучение упрочнения и разупрочнения магния с учетом анизотропии свойств. Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 1999. № 6. С. 42-46.
5. Логинов Ю.Н., Пышминцев И.Ю., Попов А.А., Лунина Т.Г. Свойства прессованного гранулированного магниевого сплава со сверхмелкозернистой структурой. Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 1998. № 6. С. 41-44.
6. Yi S., Bohlen J., Heinemann F., Letzig D. Mechanical anisotropy and deep drawing behaviour of AZ31 and ZE10 magnesium alloy sheets. Acta Materialia. 2010. V.58, №2. P. 592-605.
7. Эмли Е.Ф. Основы технологии производства и обработки магниевых сплавов. М.: Металлургия, 1972. 488 с.
8. Каменецкий Б.И., Соколов А.Л., Волков А.Ю., Антонова О.В., Клюкин И.В. Способ изготовления фольги из магния. Патент РФ №2563077. Опубликовано 20.09.2015, Бюл. №26.

### Сведения об авторах

**Кругликов Николай Александрович** - к-т физ.-мат. наук, ст. научн. сотр. лаб. прочности ИФМ УрО РАН, E-mail: [nick@imp.uran.ru](mailto:nick@imp.uran.ru)

**Логинов Юрий Николаевич** - д-р техн. наук, проф., проф. кафедры ОМД Уральского федерального университета, E-mail: [j.n.loginov@urfu.ru](mailto:j.n.loginov@urfu.ru)

**Каменецкий Борис Исаакович** – к-т техн. наук, вед. научн. сотр. лаб. прочности ИФМ УрО РАН, E-mail: [kamenetski@imp.uran.ru](mailto:kamenetski@imp.uran.ru)

**Волков Алексей Юрьевич** – д-р техн. наук, зав. лаб. прочности ИФМ УрО РАН, E-mail: [volkov@imp.uran.ru](mailto:volkov@imp.uran.ru)